

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**UTJECAJ HRAPAVOSTI POVRŠINE NA TVRDOĆU  
HLADNO IZOSTATIČKI OBLIKOVANE  $\text{Al}_2\text{O}_3$  KERAMIKE**

***Ilija Tolić***

Zagreb, 2010.

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**UTJECAJ HRAPAVOSTI POVRŠINE NA TVRDOĆU  
HLADNO IZOSTATIČKI OBLIKOVANE  $\text{Al}_2\text{O}_3$  KERAMIKE**

**Voditelj rada:**  
***Prof. dr. sc. Lidija Ćurković***

***Ilija Tolić***

Zagreb, 2010.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ja, Tolić Ilija izradio samostalno završni rad preddiplomskog studija na temu " Utjecaj hrapavosti površine na tvrdoću hladno izostatički oblikovane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  keramike" koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Pomoć pri izvođenju pokusa i odabiru stručne literature pružili su mi mentorica prof. dr. sc. Lidija Ćurković, doc. dr. sc. Vera Rede, tehnički suradnik Tomislav Habek sa Zavoda za kvalitetu i laborant Roman Divjak te laborantica Nada Varga iz laboratorija za metalografiju.

---

Tolić Ilija

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Općenito o tehničkoj keramici.....	2
2.2. Sistematizacija tehničke keramike.....	3
2.3. Aluminij oksidna keramika .....	5
2.4. Svojstva tehničke keramike .....	6
2.4.1. Gustoća tehničke keramike.....	7
2.4.2. Čvrstoća tehničke keramike.....	7
2.4.3. Elastična svojstva tehničke keramike.....	8
2.4.4. Tvrdoća tehničke keramike .....	10
2.4.5. Toplinska svojstva tehničke keramike.....	10
2.5. Tvrdoća aluminij oksidne keramike.....	11
2.6. Površinska hrapavost .....	13
2.7. Keramografija .....	15
2.7.1. Izrada uzoraka .....	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	19
3.1. Priprema uzorka $\text{Al}_2\text{O}_3$ keramike za određivanje tvrdoće .....	19
3.2. Mjerenje tvrdoće .....	24
3.3. Mjerenje hrapavosti .....	25
4. REZULTATI I DISKUSIJA .....	26
4.1. Rezultati mjerenja hrapavosti .....	26
4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće .....	29
5. ZAKLJUČCI.....	44
6. POPIS LITERATURE .....	45

## **Sažetak**

U radu je određen utjecaj hrapavosti površine na tvrdoću hladno izostatički oblikovane Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramike. Pri određivanju lomne tvrdoće po Vickersu korištena su opterećenja: 9,81 N (HV1), 29,43 N (HV3) i 49,05 N (HV5).

Tvrdoća se određivala na tri različite hrapavosti površina. Različite hrapavosti ispitivane površine dobivene su završnim poliranjem dijamantnom pastom s česticama od 0,25, 3 i 6 µm.

Dobiveni Rezultati su pokazali da hrapavost površine neznatno utječe na promjenu tvrdoće.

Također se ustanovilo da se povećanjem sile utiskivanja tvrdoća Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramike smanjuje.

## Popis oznaka i mjernih jedinica

$HV$	tvrdoća po Vickersu,
$F$	primijenjena sila, [N],
$d$	srednja vrijednost dijagonala baze piramide, [mm],
$\alpha$	koeficijent $\alpha = 0,1891$ za Vickersov penetrator,
$G$	modul smičnosti, [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	primijenjena sila, [N]
$R_a$	srednje aritmetičko odstupanje profila, [ $\mu$ m]

## Popis slika

Slika 1. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [1].....	7
Slika 2. Razdioba čvrstoće keramike i metala [1] .....	8
Slika 3. Utjecaj opterećenja na tvrdoću [3].....	11
Slika 4. Prikaz Vickersovog penetratora i mogućih oblika otisaka nakon rasterećenja [7] .....	12
Slika 5. Grafički prikaz odstupanja od oblika [9] .....	13
Slika 6. Određivanje maksimalne visine profila $R_z$ .....	14
Slika 7. Određivanje srednje linije hrapavosti oblika [8].....	14
Slika 8. Određivanje srednjeg aritmetičkog odstupanja mjerenog profila $R_a$ [8] .....	15
Slika 9. Računanje kontaktne površine (udjela nosivog materijala) [1] .....	15
Slika 10. Dijagram toka pripreme uzorka za keramografiju [11].....	17
Slika 11. Uzorak nakon zalijevanja .....	19
Slika 12. Brušenje uzorka na uređaju DAP-W STRUERS .....	20
Slika 13b. Površina uzorka nakon 2. faze brušenja .....	21
Slika 14b. Površina uzorka nakon 4. faze brušenja .....	22
Slika 15. Površina uzorka nakon 5. faze brušenja .....	22
Slika 16a. Površina nakon 1. stupnja poliranja .....	23
Slika 17b. Površina nakon 2. stupnja poliranja .....	23
Slika 18. uređaj za mjerenje hrapavosti površine MU2-127.....	25
Slika 19. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica $0,25 \mu m$ .....	26
Slika 20. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica $3 \mu m$ .....	27
Slika 21. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica $6 \mu m$ .....	28
Slika 22. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom $0,25 \mu m$ .....	29
Slika 23. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom $3 \mu m$ .....	30
Slika 24. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom $6 \mu m$ .....	30

Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom $0,25\ \mu\text{m}$ . .....	34
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom $3\ \mu\text{m}$ . .....	38
Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom $6\ \mu\text{m}$ . .....	42
Slika 28. Dijagramski prikaz ovisnosti tvrdoće o sili utisnuća.....	43



## Popis tablica

<i>Tablica 1. Parametri brušenja.....</i>	<i>21</i>
<i>Tablica 2. Parametri poliranja.....</i>	<i>23</i>
<i>Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 0,25 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV1.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 0,25 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV3.....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 0,25 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV5.....</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 6. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25 <math>\mu m</math>. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 3 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV1.....</i>	<i>35</i>
<i>Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 3 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV3.....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 3 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV5.....</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 10. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3 <math>\mu m</math>. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 6 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV1.....</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 6 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV3.....</i>	<i>40</i>
<i>Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 6 <math>\mu m</math> pod opterećenjem HV5.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 14. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6 <math>\mu m</math>. ....</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 15. Prosječne vrijednosti tvrdoća za hrapavost površine nakon završnih poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 0,25 <math>\mu m</math>, 3 <math>\mu m</math> i 6 <math>\mu m</math> .....</i>	<i>43</i>

## **1. UVOD**

Keramika dolazi od grčke riječi **κεραμος** (keramos) koja označava glinu za lončarske predmete. Pod keramičkim materijalima podrazumijevaju se anorganski materijali koji su sastavljeni od metalnih i nemetalnih elemenata spojenih ionskim i/ili kovalentnim vezama. Zbog svoje izuzetno široke primjene, iz grupe oksidne keramike najvažniji materijal je aluminij oksidna keramika (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Široku primjenu keramičkih materijala omogućuju njihova specifična svojstva kao što su visoka tvrdoća, visoka tlačna i savojna čvrstoća, visoki modul elastičnosti, niska toplinska i električna vodljivost, visoka otpornost na trošenje, mala gustoća, niska toplinska rastezljivost i kemijska postojanost. Najčešće se upotrebljava u elektrotehničkoj industriji, no česta joj je primjena i u automobilske industriji zbog dimenzijske postojanosti na visokim temperaturama, te u metalurgiji.

U ovom radu ispitan je utjecaj hrapavosti na tvrdoću aluminij oksidne keramike. Određivanje tvrdoće je jedno od najčešće određivanih mehaničkih svojstava tehničke keramike.

Osnovna pretpostavka ovog rada je da hrapavost površine ima veliki utjecaj na vrijednosti tvrdoće. Dobiveni rezultati i zaključci trebali bi ovu pretpostavku potvrditi i li demantirati te doprinijeti boljem razumijevanju utjecaja hrapavosti na tvrdoću Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramike.

## **2. TEORIJSKI DIO**

### **2.1. Općenito o tehničkoj keramici**

Proizvodi izrađivani od keramike su korišteni još u pretpovijesnim vremenima koja sežu i do 10000 godina unatrag. Riječ keramika izvorno potječe od grčke riječi *keramos* (*κεραμος*) što u prijevodu znači lončarska roba, odnosno glineno posuđe. Keramika je anorganska tvorevina izgrađena od metalnih i nemetalnih elemenata koji su međusobno povezani ionskim i/ili kovalentnim vezama.

Opće razumijevanje keramike se tumači kao krhak i tvrd materijal sa dobrim izolacijskim svojstvima. Tehnička keramika ima izuzetno dobra svojstva što omogućuje njenu široku primjenu u tehnici. Strojni dijelovi u današnjoj primjeni zahtijevaju visoku otpornost na trošenje, pa je tehnička keramika uz traženo svojstvo i visoku tvrdoću postala skoro savršen materijal za izradu strojnih dijelova. Na svojstva keramičkih materijala utječe kemijski sastav i njihova mikrostruktura. Ciljanim stvaranjem određenih mikrostruktura mogu se dobiti keramički materijali određenih mehaničkih i fizikalnih svojstava.

Unatoč izuzetno dobrim svojstvima njenu primjenu u pojedinim slučajevima ograničavaju niska otpornost na toplinski umor, niska vlačna čvrstoća te mala žilavost.

Također jedan od bitnih nedostataka u primjeni keramike u tehnici je nepoznavanje njenih svojstava kada se radi o konstruiranju. Tu konstruktori baš iz navedenog razloga izbjegavaju njenu primjenu. Također i činjenica da se principi proračuna te konstrukcijsko-tehnološkog oblikovanja bitno razlikuju od principa klasičnih konstrukcijskih materijala, bitno pridonosi ograničenosti uporabe tehničke keramike.

## 2.2. Sistematizacija tehničke keramike

a.) Podjela tehničke keramike **prema sastavu**:

- oksidna keramika,
- neoksidna keramika,
- silikatna keramika.

Pod **oksidnom keramikom** podrazumijeva se materijal koji se sastoji od jednokomponentnih metalnih oksida izgrađenih od jedne kristalne faze. Sintetičkim putem dobivene sirovine se koriste za dobivanje oksidne keramike i imaju visoki stupanj čistoće. Iz tog razloga keramički materijali iz skupine oksidne keramike nemaju udio staklene faze ili je taj udio izuzetno nizak. Pri visokim temperaturama sinteriranja ove vrste keramike nastaje vrlo ujednačena mikrostruktura. Ujednačena mikrostruktura je razlog izuzetno dobrih svojstva.

Primjeri jednokomponentnog sustava oksidne keramike su aluminij oksid ( $Al_2O_3$ ), magnezij oksid ( $MgO$ ), cirkonij oksid ( $ZrO_2$ ), titan oksid ( $TiO_2$ ).

**Neoksidna keramika** se isključivo proizvodi od sintetičkih sirovina. Za izvanredne kombinacije svojstava zaslužni su visoki udjeli kovalentnih veza u karbidnim i nitridnim kristalnim strukturama.

Postupak dobivanja gotovog proizvoda od sintetičkog sirovinskog praha skuplji je nego kod oksidne keramike. Prilikom proizvodnje sirovina mora biti izuzetno fino mljevena, proces izgaranja zahtjeva atmosferu bez kisika, vakuum ili inertni plin u hermetički zatvorenim komorama, kao i temperature izgaranja od preko 2000 °C.

Ovoj skupini keramike pripadaju materijali na temelju spojeva bora, ugljika, dušika i silicija. Najvažniji predstavnici neoksidne keramike jesu: silicij karbid ( $SiC$ ), silicij nitrid ( $Si_3N_4$ ), aluminij nitrid ( $AlN$ ), bor-karbid ( $B_4C_3$ ) i dr.

**Silikatna keramika** ima veliku primjenu u termotehnici, mjernoj i regulacijskoj tehnici, procesnoj tehnici, u tehnici visokog i niskog napona (izolatori, osigurači,

katalizatori i kućišta) kao i u izradi elektroinstalacija i vatrostalnih proizvoda. Silikatna keramika je najstarija vrsta keramike. U silikatnu keramiku se ubrajaju: tehnički porculan, steatit, kordijerit, mulit. Glavne sirovine iz kojih se dobivaju su glina i kaolin, glinenci i talk (milovka) koji sadrže silicij.

b.) Podjela tehničke keramike prema namjeni:

- funkcionalna keramika
  - visokokvalitetna keramika
  - konstrukcijska keramika (industrijska i inženjerska)
  - elektrokeramika
  - rezna keramika
  - biokeramika
- 
- **Funkcionalna keramika** je visokokvalitetan materijal čija se svojstva koriste za određenu funkciju (npr. keramički dijelovi koji iskazuju posebna električna, magnetska, dielektrična ili optička svojstva).
  - **Visokokvalitetna keramika** se definira kao visokorazvijen, visokokvalitetan keramički materijal koji je pretežno nemetalan i anorganski te posjeduje određena ciljana svojstva.
  - **Konstrukcijska keramika (industrija i inženjerska)** podrazumijeva materijale koji u bilo kojem obliku moraju izdržati mehanička opterećenja, kao što su savojna i tlačna opterećenja.
  - **Elektrokeramika** je visokokvalitetna keramika koja se, na temelju svojih specifičnih svojstava, primjenjuje u elektrotehnici i elektronici. U navedenom području je pogodna zbog svojih izolacijskih.
  - **Rezna keramika** je visokokvalitetna keramika, koju karakterizira svojstvo otpornosti na trošenje i visoke temperature, te je prikladna za izradu alata za obradu odvajanjem čestica (tokarenje, bušenje, glodanje).
  - **Biokeramika** je visokokvalitetna keramika koja se koristi u medicini (za nadomjeske, izradu i popravak tvrdog tkiva, kostiju, zubi itd.).

### **2.3. Aluminij oksidna keramika**

Aluminij oksidna ( $Al_2O_3$ ) keramika je najvažniji materijal iz grupe oksidne keramike s obzirom na izuzetno široku primjenu. Najistaknutija svojstva aluminij oksidne keramike su:

- visoka gustoća (obzirom na druge vrste keramika),
- niska žilavost,
- visoka čvrstoća i tvrdoća,
- temperaturna stabilnost,
- velika otpornost abrazijskom trošenju,
- dobar električni izolator,
- korozijska postojanost pri povišenim temperaturama,

U primjeni se najčešće koristi aluminij oksidna keramika s udjelom aluminij oksida u području od 80 % do 99 %. Ovisno o udjelu aluminij oksida, aditiva, nečistoća i procesa sinteriranja mogu se dobiti različite strukture, a time i različita svojstva aluminij oksidne keramike. Udjel aluminij oksida ne određuje direktno mehanička svojstva jer ona ovise o pripremi praha za proizvodnju keramike.

Zbog vrlo povoljnog omjera cijene i kvalitete te općenitih svojstava aluminij oksidna keramika primjenjuje se u sljedećim područjima:

- industriji sanitarija za brtvene elemente,
- elektrotehnici za izolacijske dijelove,
- elektronicima za supstrate,
- strojogradnji i izgradnji postrojenja za dijelove otporne na trošenje,
- kemijskoj industriji za dijelove otporne na koroziju, visoke temperature, paru, taline i trosku,
- mjernoj tehnici za zaštitne cijevi termoelemenata za mjerenja pri visokim temperaturama,
- medicini za implantate,
- za visokotemperaturnu primjenu kao što su sapnica za plamenik i nosače cijevi grijača.

## **2.4. Svojstva tehničke keramike**

Višestruke mogućnosti primjene keramičkih proizvoda temelje se na specifičnim svojstvima keramičkih materijala koja često nisu dostižna ostalim materijalima

Dobra svojstva tehničke keramike su:

- velika tvrdoća,
- velika čvrstoća,
- visoke dopuštene temperaturne primjene,
- stabilnost oblika (specifična krutost),
- korozijska postojanost, otpornost na kemijske utjecaje bilo koje vrste,
- otpornost na trošenje,
- vrlo dobra električna izolacijska svojstva,
- dielektrična i feroelektrična svojstva,
- mala gustoća,
- mala ili velika toplinska vodljivost.

Nedostaci tehničke keramike općenito su:

- mala žilavost – visoka krhkost,
- niska otpornost toplinskom umoru (šoku),
- niska vlačna čvrstoća,
- velika rasipanja vrijednosti za svojstva,
- visoki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja.

	Keramika	Metal	Polimeri
Tvrdoća	↑	↓	↓
Modul elastičnosti	↑	↑	↓
Otpornost na visoke temperature	↑	↓	↓
Toplinska rastezljivost	↓	↑	↑
Duktilnost	↓	↑	↑
Otpornost na koroziju	↑	↓	↓
Otpornost na trošenje	↑	↓	↓
Električna vodljivost	↑	↑	↓
Gustoća	↓	↑	↓
Toplinska vodljivost	↑	↑	↓

↑ Tendencija k višim vrijednostima    ↓ Tendencija k nižim vrijednostima

Slika 1. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [1]

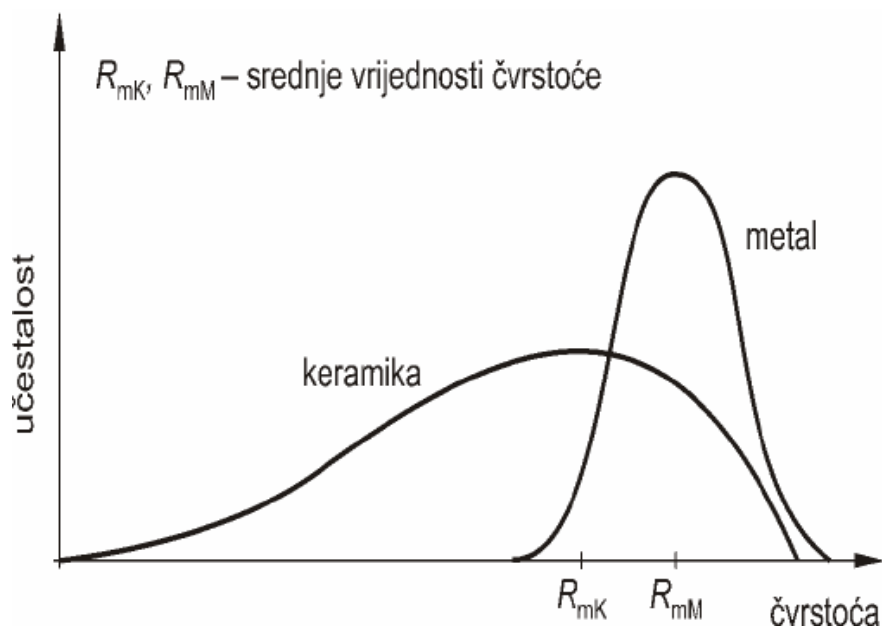
#### 2.4.1. Gustoća tehničke keramike

Gustoća tehničke keramike iznosi 20 do 70% gustoće čelika. Ovo pak znači da bi se primjenom tehničke keramike u konstrukcijske svrhe moglo postići veliko smanjenje mase pri izradi pokretnih dijelova u strojarstvu. Smanjenjem gustoće materijala također smanjujemo i mehanička opterećenja što nam izravno poboljšava mehanička svojstva konstrukcije.

#### 2.4.2. Čvrstoća tehničke keramike

Čvrstoća je jako ovisna o sastavu materijala, veličini zrna sirovine i dodatnih materijala, te o uvjetima i postupcima proizvodnje. Čvrstoća je znatno slabija od većine metala no neki keramički materijali ipak mogu pri zahtjevu na čvrstoću zamijeniti metalne dijelove. Na slici 2, prikazan je dijagram koji prikazuje odnos srednje vrijednosti čvrstoće za keramičke i metalne materijale.





Slika 2. Razdioba čvrstoće keramike i metala [1]

**Savojna čvrstoća** najvažnija je veličina za procjenu čvrstoće. Vrijednost savojne čvrstoće ovisna je o veličini proizvoda, obliku, kvaliteti površine (brušena, polirana), te o nehomogenosti strukture koja je određena postupkom proizvodnje.

**Tlačna čvrstoća** keramike 5 do 10 puta veća je od savojne. Vlačna čvrstoća je niska, do 20 puta manja od savojne.

**Vlačna čvrstoća** je i do 20 % manja od savojne čvrstoće. Prilikom konstruiranja treba izbjegavati ili minimizirati vlačna naprezanja.

#### 2.4.3. Elastična svojstva tehničke keramike

Pod elastična svojstva ubrajaju se :

- Modul elastičnosti,
- Poprečna kontrakcija,
- Modul smičnosti,
- Rast pukotina,
- Puzanje.

**Modul elastičnosti** kod gotovo svih materijala oksidne i neoksidne keramike veći je nego kod čelika. Sile kod konstrukcija keramika/metal, zbog velike krutosti uglavnom preuzima keramika.

**Poprečna kontrakcija ( $\nu$ )**, odnosno Poissonov omjer prikazuje omjer (negativne) poprečne deformacije  $\epsilon_2$ , prema istezanju,  $\epsilon_1$ . Vrijednosti Poissonova omjera za keramiku su  $\nu \approx 0,18 - 0,3$ .

**Modul smičnosti ( $G$ )** je specifična deformacija pri čistom smiku i djelovanju tlaka sa svih strana a prikazuje se formulom:

$$G = \tau/\gamma$$

Gdje je:

$\tau$  = smično naprezanje,

$\gamma$  = kut smika.

Modul smičnosti kod keramike iznosi oko 1/3 modula elastičnosti.

**Rast pukotina** bitan je problem strojno opterećene keramike. Ukoliko je dio izložen naprezanju ispod svoje čvrstoće i vodi ili vlažnoj okolini može doći do sporog ali s povećanjem naprezanja i vrlo brzog širenja kritične pukotine što će na kraju rezultirati lomom. Ovaj podkritičan rast pukotine koji je poznatiji pod nazivom napetosna korozija nastupa kod neoksidne keramike koja ima amorfnu oksidnu fazu na granicama zrna.

**Puzanje** keramičkih materijala pri temperaturama nižim od 1000 °C je malo. No pri temperaturama većim od 1000 °C može doći do problema, zato što kod keramike za razliku od metalnih materijala deformacije od nekoliko postotaka nastale zbog puzanja mogu uzrokovati otkazivanje funkcije materijala. Bitno je napomenuti da se pukotine u keramici homogeno raspoređuju i uzrokuju oštećenja po čitavom

opterećenom volumenu. Na puzanje keramičkih materijala utječu kemijske veze, veličina zrna, oblik zrna, poroznost, granice zrna.

#### **2.4.4. Tvrdoća tehničke keramike**

Tvrdoća je pokazatelj otpornosti na deformiranje. Keramički dijelovi imaju veliku tvrdoću što uvjetuje veliku krutost i stabilnost oblika. Visoka tvrdoća tehničke keramike vodi k boljoj otpornosti na trošenje. No zbog povišene tvrdoće keramika ima problem slabe mogućnosti plastične deformacije i razgradnje koncentracije naprezanja što uvjetuje da dio često puca.

Tvrdoća ovisi o opterećenju. Kod nekih materijala tvrdoća se smanjuje porastom opterećenja (normalan utjecaj opterećenja na tvrdoću), dok kod nekih materijala tvrdoća se povećava sa opterećenjem (obrnuti utjecaj opterećenja na tvrdoću).

#### **2.4.5. Toplinska svojstva tehničke keramike**

U toplinska svojstva keramike ubrajaju se:

- Toplinska vodljivost,
- Toplinska rastezljivost,
- Otpornost na promjene temperature.

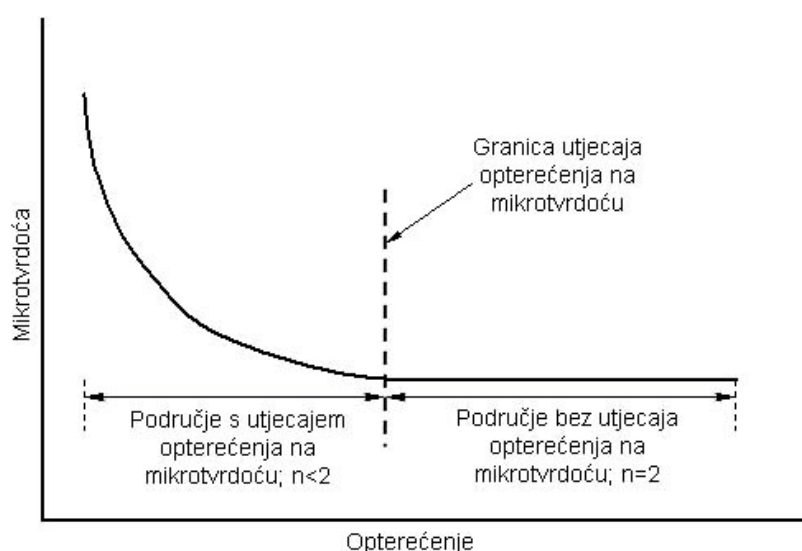
**Toplinska vodljivost ( $\lambda$ )** keramičkih materijala je u pravilu manja nego kod čelika i bakra. Silicij karbidna keramika razlikuje se od ostalih keramika zbog svoje relativno velike toplinske vodljivosti u odnosu na ostale keramičke materijale koji se koriste kao izolatori zbog svoje relativno male toplinske vodljivosti.

**Toplinska rastezljivost ( $\alpha$ )** tehničke keramike manja je nego kod čelika i sivog lijeva.

Osjetljivost keramike na toplinske šokove uzrokuju zaostala naprezanja uzrokovana gradijentima porasta temperature kao i izrazita krhkost tehničke keramike. Ukoliko imamo brze i velike promjene temperatura u keramici se počinju javljati naprezanja koja izazivaju rast pukotina koje će također dovesti do ubrzanog loma materijala.

## 2.5. Tvrdoća aluminij oksidne keramike

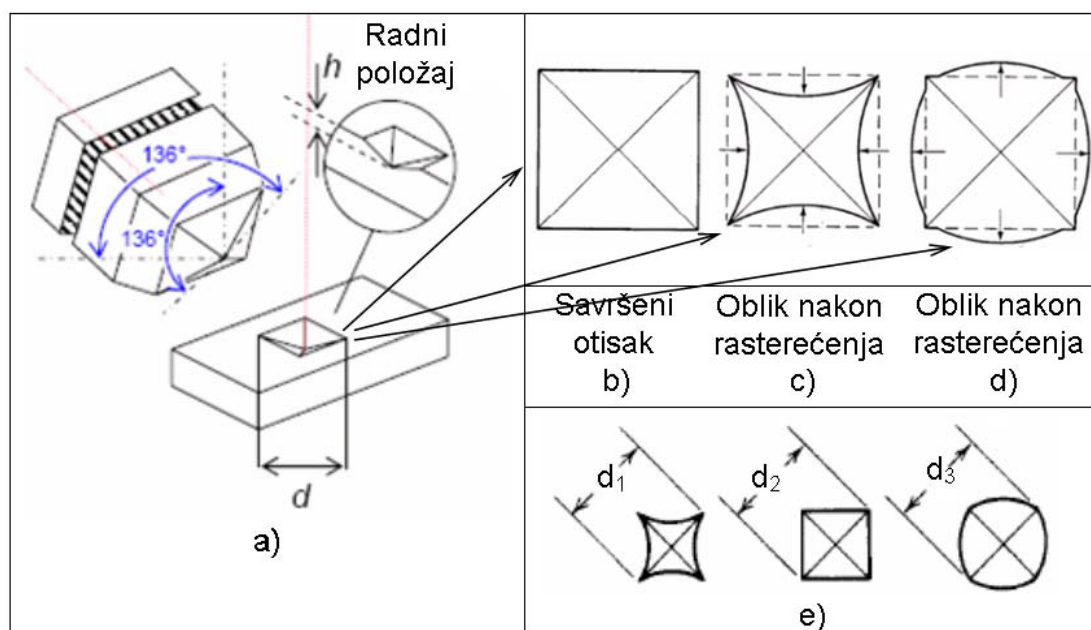
Istraživanja su pokazala da tvrdoća obično ovisi o opterećenju. Kod nekih materijala tvrdoća (prividna) se smanjuje porastom opterećenja (normalan utjecaj opterećenja na tvrdoću) dok kod nekih materijala tvrdoća se povećava s opterećenjem (obrnuti utjecaj opterećenja na tvrdoću). Pri vrlo malim opterećenjima prividna tvrdoća je funkcija primijenjenog opterećenja, dok pri visokim opterećenjima (područje bez utjecaja opterećenja na tvrdoću) tvrdoća ima konstantnu vrijednost. Prema literaturnim podacima tvrdoća koja ne ovisi o opterećenju odnosi se na "stvarnu" tvrdoću. Utjecaj opterećenja na tvrdoću zamijećen je kod metalnih materijala, anorganskog stakla i keramičkih materijala (monokristali i polikristali) i kod polimernih materijala. Utjecaj opterećenja na tvrdoću je shematski prikazan na slici 3.



Slika 3. Utjecaj opterećenja na tvrdoću [3]

Postoji nekoliko objašnjenja o porijeklu utjecaja opterećenja na tvrdoću. Najuobičajenije tumačenje po odnosi se na objašnjenje pogrešaka koje proizlaze iz omjera elastične i plastične deformacije tijekom formiranja otiska; kočenje gibanja dislokacija, granice zrna, kao i elastičnih pomaka nakon rasterećenja; otvrdnjavanje tijekom utiskivanja; optička rezolucija leća objektiva koje se koriste; pojava zaostalih napetosti na površini uzorka nastalih uslijed brušenja i poliranja površine uzorka prije mjerenja tvrdoće, itd. [5, 6].

Za određivanje tvrdoće keramičkih materijala koristi se metoda po Vickersu, Rockwell ili po Knoopu. Određivanje tvrdoće metodom po Vickersu temelji se na mjerenju veličine otiska koji je nastao nakon utiskivanja dijamantnog penetratora određenim opterećenjem na ispoliranu površinu uzorka. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Utiskivanjem penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide, što se vidi iz slike 4.



Slika 4. Prikaz Vickersovog penetratora i mogućih oblika otisaka nakon rasterećenja [7]

Otisak kojeg ostavi Vickersova piramida nije uvijek savršenog oblika (slika 7a), već dolazi do iskrivljenja uslijed elastičnog efekta. Na slici 7c, prikazan je oblik otiska nakon rasterećenja koji se deformirao uslijed elastičnog povrata materijala oko ravnih površina penetratora, odnosno došlo je do smanjivanja (skupljanja) površine otiska, a na slici 7d, vidi se deformacija otiska uslijed proširenja površina odnosno povećanja površine otiska oko ravnih površina penetratora. Utjecaj elastične deformacije na veličinu otiska prikazuje slika 7e, na kojoj su shematski prikazana tri otiska jednakih dijagonala, ali različitih površina ( $d_1 = d_2 = d_3$ ;  $A_1 < A_2 < A_3$ ).

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale ( $d_1$  i  $d_2$ ) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje iz jednadžbe:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2}$$

Gdje je:

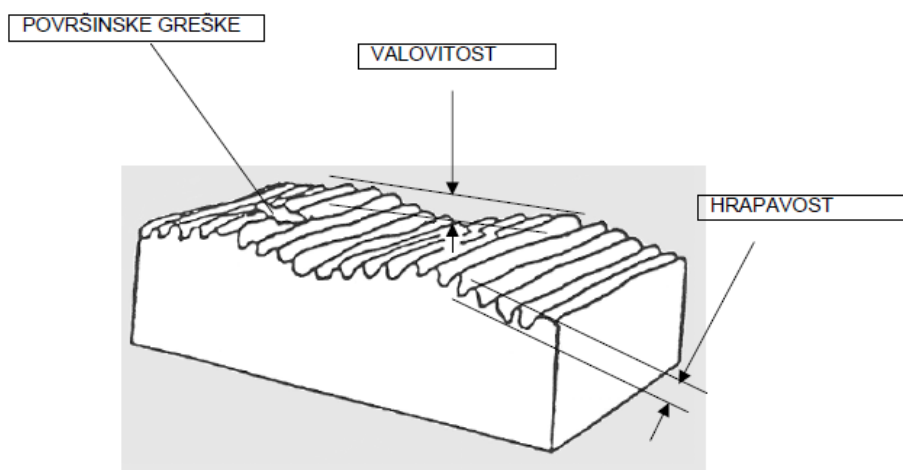
F - primijenjena sila u Newton-ima (N)

d - srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

## 2.6. Površinska hrapavost

Površinska hrapavost se definira kao sveukupnost mikroteometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su prouzrokovane postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima.

Kod keramičkih materijala površine nemaju ravnomjernu strukturu već sadrže određena odstupanja oblika koja se dijele na hrapavost, valovitost i oblik što je prikazano na slici 5.

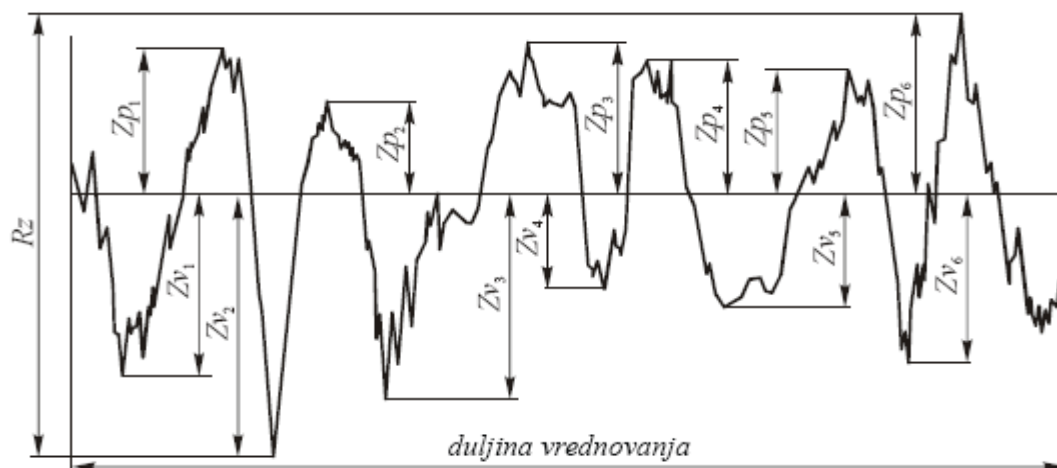


Slika 5. Grafički prikaz odstupanja od oblika [9]

Bitne veličine hrapavosti za keramičke izratke su:

- $R_a$  - prosječno odstupanje profila hrapavosti,
- $R_z$  - maksimalna visina neravnina,
- $M_r$  – kontaktna površina odnosno udio nosivog materijala.

**Maksimalna visina profila  $R_z$**  je zbroj duljine najveće visine vrha profila **Zp** i najveće dubine dna profila **Zv** na dužini vrednovanja, [8]. Određivanje maksimalne visine profila **Rz** prikazano je na slici 6.



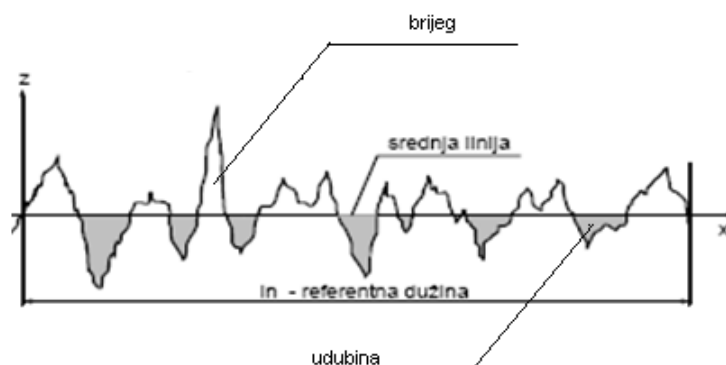
Slika 6. Određivanje maksimalne visine profila  $R_z$

**Srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila  $R_a$**  predstavlja aritmetički prosjek apsolutne ordinatne vrijednosti  $Z(x)$  na dužini uzorka, te je teoretski iskazano formulom:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(X)| dx \quad \text{ili} \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Zx_i| \quad (3)$$

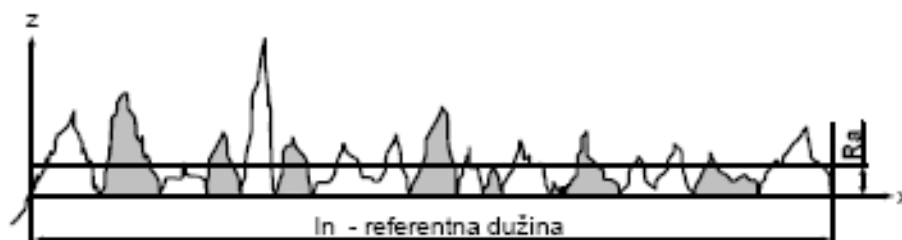
Gdje je  $n$  broj ordinata  $Zx$  koraka  $\Delta x$ .

Kod izračunavanja srednjeg aritmetičkog odstupanja profila **Ra** kao prvo je potrebno snimiti najveće visine vrha profila **Zp** i najveće dubine dna profila **Zv** i potom odrediti i nacrtati srednju liniju hrapavosti profila kao što je pokazano slikom 7.



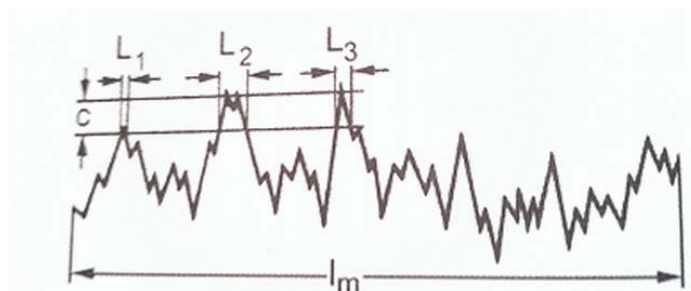
Slika 7. Određivanje srednje linije hrapavosti oblika [8]

Potrebno je odrediti visine vrha profila **Zp** i zajedno sa već postojećim visinama vrha profila **Zp** izračunati srednje aritmetičko odstupanje mjerenog oblika **Ra** koje će predstavljati ravninu koja najbolje aproksimira polovicu udaljenosti između referentne dužine odnosno osi x i visine vrhova profila **Zp** brjegova, što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Određivanje srednjeg aritmetičkog odstupanja mjerenog profila  $R_a$  [8]

**Kontaktna površina  $M_r$**  je definirana kao udio površine nalijeganja (na određenoj reznjoj liniji) prema ukupnoj površini.



Slika 9. Računanje kontaktne površine (udjela nosivog materijala) [1]

$$M_r = \frac{1}{l_m} (L_1 + L_2 \dots L_n) \times 100[\%] \quad (4)$$

## 2.7. Keramografija

Keramografija je područje znanosti o keramici unutar kojeg se proučava struktura keramike, te razvoj i primjena tehnika i postupaka izrade uzoraka za analizu. Time se dobiva bolji uvid u strukturu i svojstva [11].

Pod pojmom keramografija podrazumjeva se analiza mikrostrukture keramike reda veličine približno od 0,1 do 100  $\mu m$ . Područje od oko 100  $\mu m$  je granica razlučivanja ljudskim okom bez pomagala. Razina strukture koja je veća od 100  $\mu m$  zove se makrostruktura.



Mikrostruktura keramike obuhvaća:

- kristalna zrna,
- granice zrna,
- sekundarne faze,
- pore,
- mikropukotine.

Mehanička, optička, toplinska, električna i druga svojstva keramike odraz su mikrostrukture. Svojstva, metode i uvjeti proizvodnje općenito se odražavaju na mikrostrukturu. Uzroci mnogih nedostataka su vidljivi u mikrostrukturi.

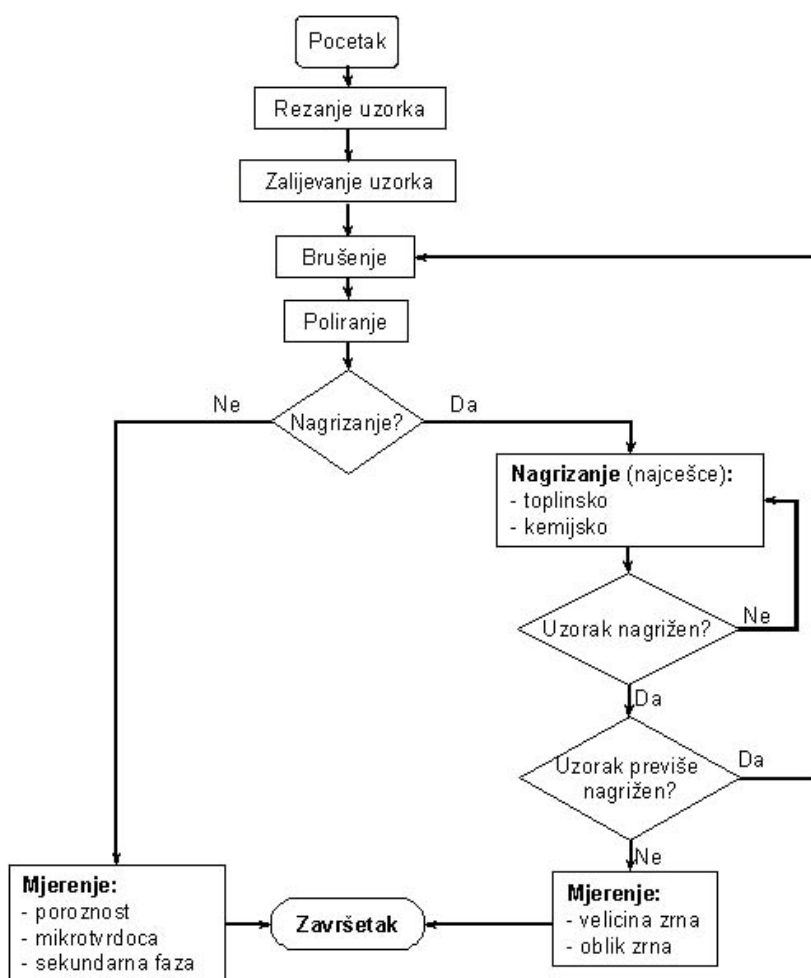
### **2.7.1. Izrada uzoraka**

Postupci izrade uzoraka svrstavaju se u dvije osnovne skupine:

- uzimanje uzorka,
- priprava uzorka.

Procesi uključeni u pripravu uzorka za keramografiju su (slika 10):

- rezanje uzorka,
- zalijevanje uzorka polimernim materijalom,
- brušenje,
- poliranje,
- nagrivanje.



Slika 10. Dijagram toka priprave uzorka za keramografiju [11]

Svrha **uzimanja uzoraka rezanjem** je izdvajanje reprezentativnog uzorka iz keramičke komponente koji će biti prikladan za brušenje, poliranje i promatranje pod mikroskopom ili izdvajanje dijela uzorka koji je zanimljiv za istraživanje.

Rezanje uzorka se obavlja uređajem za rezanje sa metalnim diskom koji rotira velikim brojem okretaja. Opterećenje pri kojem se obavlja rezanje se kreće od 4,9 N do 9,81 N (od 500g do 1000 g). Brzinu okretanja diska se kreće od 2000 do 5000 okretaja u minuti. Ako se želi povećati brzina rezanja bolje je povećati brzinu okretanja diska nego opterećenje, iz razloga što veća opterećenja uzrokuju veće oštećenje ispitnog uzorka nego veća brzina okretanja diska.

Površina koja se reže mora biti 10 % do 50 % promjera kalupa koji se koristi. Rezanje se provodi uz sredstvo za hlađenje. Keramika mora biti netopljiva u sredstvu za hlađenje.

Zbog malih dimenzija, nepravilnog oblika, ali i potrebe uvida u mikrostrukturu na rubovima uzoraka prije brušenja, **uzorci se zalijevaju polimernim materijalom**. Uzorci se moraju učvrstiti u posebna sredstva koja omogućuju njihov prihvata i kvalitetnu pripremu. Zalijevanje uzoraka može biti toplo i hladno. Toplo se zalijeva prešanjem s prahom na povišenim temperaturama do 180 °C i tlakom do 4 bara. Hladno se zalijeva uz pomoć dvo ili trokomponentnih sredstava.

**Brušenje** uzoraka je postupak kojim se uklanjaju tragovi rezanja, uzorci se ravnaju te se čisti površina. Abrziv koji se koristi za brušenje je vezan za brusnu ploču.

Brusiti se uzorci mogu ručno ili automatski. Ručno brušenjem dobiva se bolja kontrola dubine brušenja u odnosu na automatsko brušenje, što može biti ključno kod određivanja poprečnog presjeka pri specifičnoj dubini. Za brušenje keramike koriste se abrazivi od dijamanta, ali se također primjenjuje papir sa silicij karbidom (SiC) i ploče kubičnog bor nitrida (CBN).

**Analizom uzoraka nakon poliranja** određuje se da li uzorak sadrži pore, mikropukotine, sekundarne faze te se određuje mikrotvrdoća.

**Nagrizanje** keramičkih materijali se najčešće provodi.

- toplinski,
- kemijski.

Također se među moguće metode nagrizanja ubrajaju još i: elektrolitičko nagrizanje, nagrizanje u talinama soli, ionsko nagrizanje, toplinsko bojanje, plazma nagrizanje, termokemijsko nagrizanje, reljefno poliranje.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Uzorak aluminij oksidne keramike ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na kojem su provedena sva ispitivanja potječe iz tvrtke Applied Ceramics, Inc., Fremont, Kalifornija, SAD.

Kemijska analiza sirovine aluminij oksida obavljena je od strane proizvođača sirovine (Alcan, Kanada). Rezultati kemijske analize keramičkog praha aluminij oksida obavio je proizvođač praha aluminij oksida (Applied Ceramics, Inc., Kalifornija, SAD).

#### 3.1. Priprema uzorka $\text{Al}_2\text{O}_3$ keramike za određivanje tvrdoće

##### Zalijevanje uzorka

Zbog bolje kvalitete i lakšeg rukovanja uzorak je potrebno zaliti u masu. "Duro Fix – 2 Kit" je masa koja se koristila za zalijevanje uzorka. Zalijevanje se vrši na hladno u određeni kalup i nakon 20 minuta uzorak se može dalje pripremati. Masa "Duro Fix – 2 Kit" se sastoji od praha i tekućine koji su pomiješani u omjeru 1:2. Uzorak nakon zalijevanja prikazan je na slici 11.



Slika 11. Uzorak nakon zalijevanja

## Brušenje

Nakon zalijevanja uzorka uslijedilo je brušenje uzorka na uređaju DAP - W STRUERS prikazanom na slici 12.

Prije nego što se uzorak postavi na ploču, ploča se prvo navlaži, a zatim se brusi dok se ne dobije željena ravnina. Nakon svake pojedine faze brušenja, skinuti uzorak se ispiru u vodi uz mali dodatak deterdženta za posuđe i zatim slijedi sljedeća faza brušenja koja se provodi na isti način.



Slika 12. Brušenje uzorka na uređaju DAP-W STRUERS

Prvi dio brušenja odvija se u 2 koraka, pomoću dijamantnih brusnih ploča različitih granulacija. Navedene brusne ploče su grit 220 ( $65\ \mu m$ ) te grit 600 ( $20\ \mu m$ ). Broj okretaj brusne ploče prilikom brušenja je 300 o/min.

U drugom dijelu brušenja brusi se brusnim papirom (SiC) finoće 1200, 2400 i 4000. Trajanje brušenja po jednom brusnom papiru iznosi oko 1 min.

Brušenje se provodi u 5 faza. U tablici 1 prikazani su parametri brušenja.

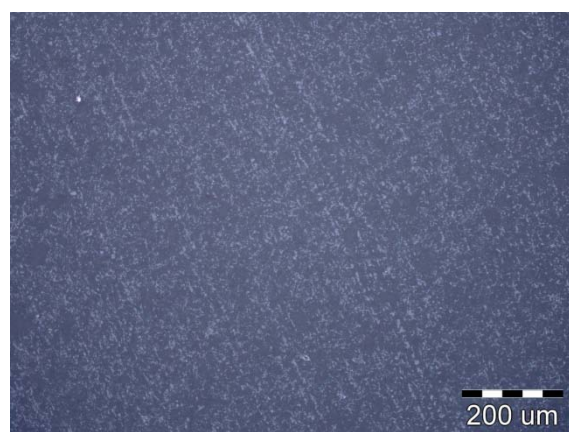
Tablica 1. Parametri brušenja

	1. faza	2. faza	3. faza	4. faza	5. faza
Podloga	Grit 220	Grit 600	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir
br. čestice	Dijamant	Dijamant	SiC	SiC	SiC
Finoća zrna	220	600	1200	2400	4000
Sila pritiska, N	75	75	75	75	75
Vrijeme, min	7	7	7	7	7
Sredstvo za hlađ. i podm.	voda	voda	voda	voda	voda
Brzina vrtnje, o/min	300	300	300	300	300

Na slici 13. prikazane su površine uzorka nakon 1. i 2. faze brušenja. Korišteni parametri za 1. i 2. fazu su vidljivi iz tablice 1.



Slika 13a. Površina uzorka nakon 1. faze brušenja

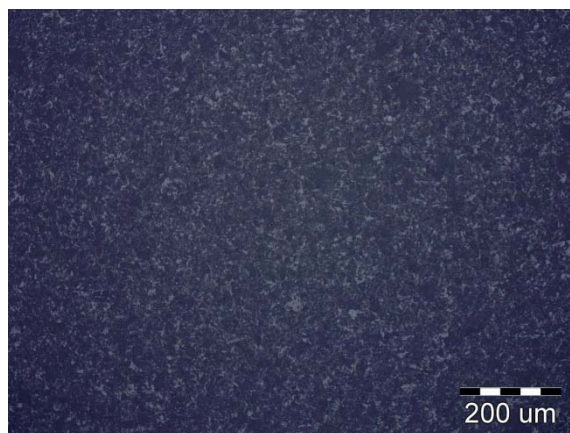


Slika 13b. Površina uzorka nakon 2. faze brušenja

Na slici 14. prikazane su površine uzorka nakon 3. i 4. faze brušenja. Korišteni parametri za 3. i 4. fazu su vidljivi iz tablice 1.



Slika 14a. Površina uzorka nakon 3. faze brušenja



Slika 14b. Površina uzorka nakon 4. faze brušenja

Na slici 15. prikazana je površina uzorka nakon 5. faze brušenja. Korišteni parametri za 5. fazu su vidljivi iz tablice 1.



Slika 15. Površina uzorka nakon 5. faze brušenja



## Poliranje

Poliranje se odvija u tri stupnja. Broj okretaja ploče za razliku od brušenja kod poliranja je 200 o/min. Parametri poliranja su prikazani u tablici 2.

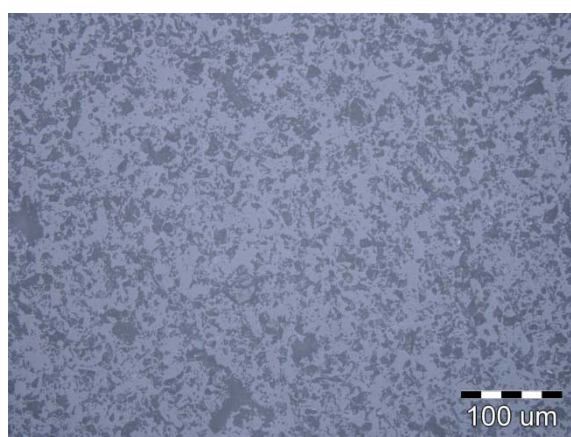
Tablica 2. Parametri poliranja

	1. stupanj	2. stupanj	3. stupanj
Podloga	DP -mol	DP - mol	OP CHEM
Abr. čestice	Dijamantna pasta	Dijamantna pasta	Dijamantna pasta
Finoća zrna	6 $\mu m$	3 $\mu m$	0,25 $\mu m$
Sila pritiska, N	75	75	75
Vrijeme, min	5	5	5
Brzina vrtnje, o/min	200	200	200

Na slici 16. prikazane su površine nakon 1. i 2. stupnja poliranja. Korišteni parametri za 1. i 2. stupanj poliranja su prikazani u tablici 2.



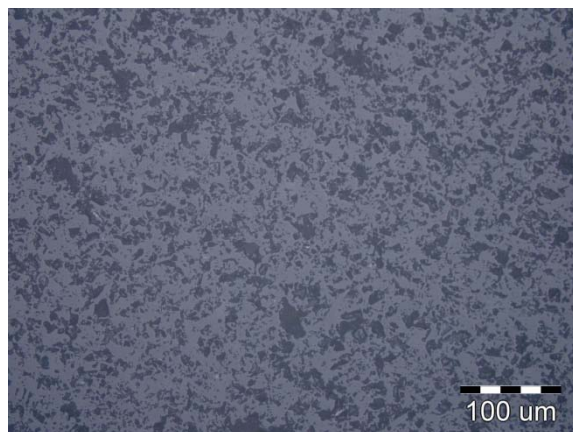
Slika 16a. Površina nakon 1. stupnja poliranja



Slika 17b. Površina nakon 2. stupnja poliranja



Na slici 17 prikazana je površina nakon 3. stupnja poliranja. Korišteni parametri za 3. stupanj poliranja su prikazani u tablici 2.



Slika 17. Površina nakon 3. stupnja poliranja

### 3.2. Mjerenje tvrdoće

U ovom projektu tvrdoća  $Al_2O_3$  keramike mjerena je Vickersovom metodom. Mjerene su tvrdoće HV1, HV3 i HV5, a sama mjerenja su izvršena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Tvrdoće su mjerene na uređaju Zwick. Na poliranom uzorku određena je tvrdoća HV1, HV3 i HV5 uz odgovarajuća opterećenja:

- 9,81 N za HV1,
- 29,43 N za HV3,
- 49,05 N za HV5.

Kao prvo tvrdoće su utiskivane na uzorku poliranim s dijamantnom pastom veličine čestica od 0,25 μm. Potom se površina pogrubljuje poliranjem sa dijamantnom pastom veličine čestica od 3 μm nakon čega je provedeno novo utiskivanje tvrdoća. Iza toga se površina pogrubljuje poliranjem sa dijamantnom pastom veličine čestica od 6 μm nakon čega je vršeno posljednje utiskivanje tvrdoća i mjerenje otisaka dijagonala.

Za gore navedena opterećenja izvršena su mjerenja dijagonala otisaka ( $d_1$  i  $d_2$ ) . Za svaku kvalitetu površine napravljeno je po 30 mjerenja za svako pojedino opterećenje (HV1, HV3, HV5).

### 3.3. Mjerenje hrapavosti

Površinska hrapavost uzorka mjerena je na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine MU2-127 (slika 18.) u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina na Zavodu za kvalitetu. Duljina mjerenja je ovisila o veličini hrapavosti, odnosno za veće hrapavosti korištena je veća mjerna duljina. Hrapavost se mjerila na tri proizvoljno odabrana mjesta.



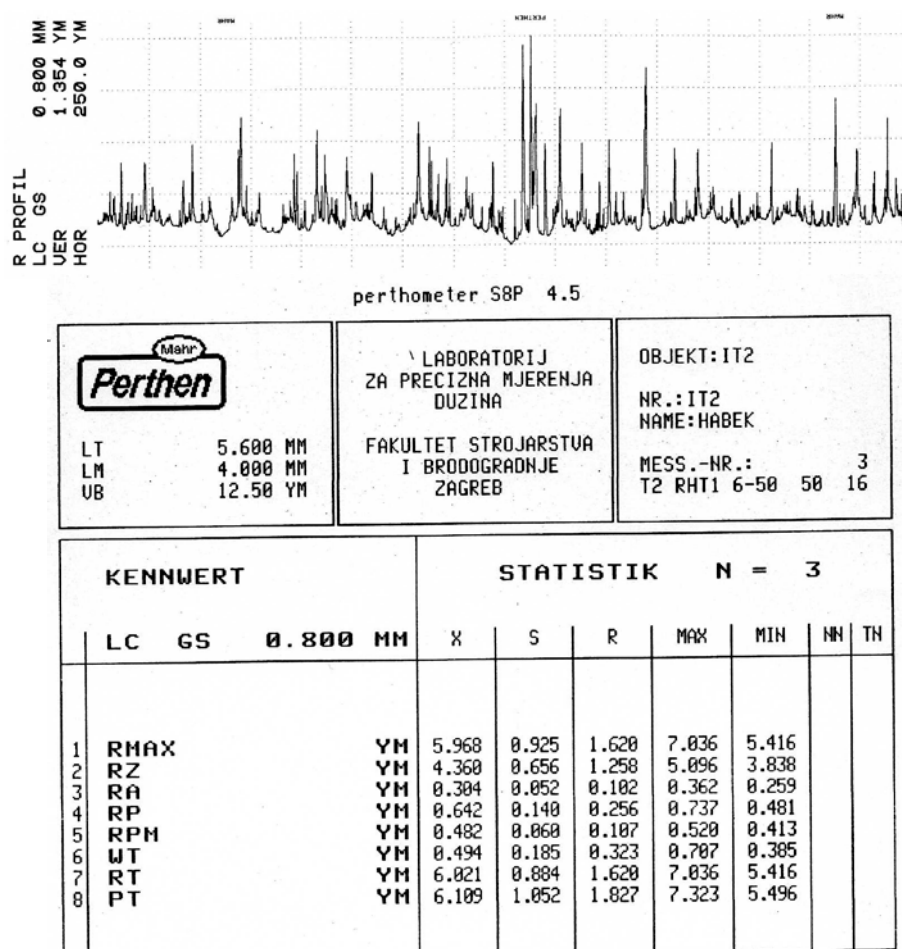
Slika 18. uređaj za mjerenje hrapavosti površine MU2-127

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1. Rezultati mjerenja hrapavosti

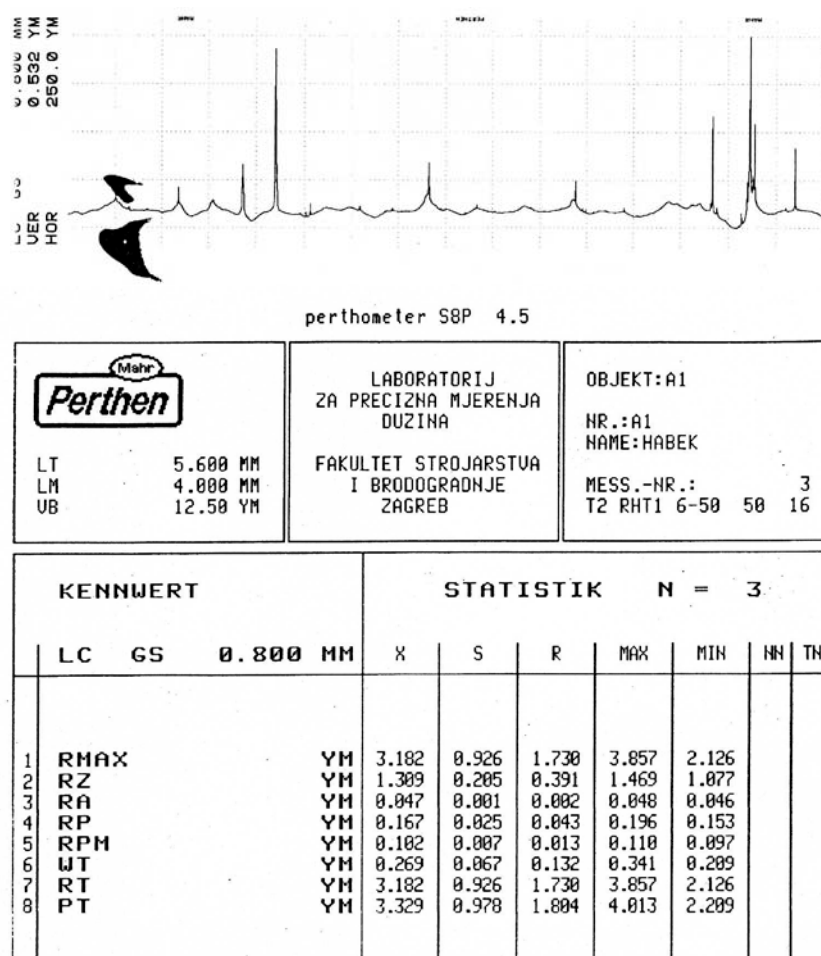
Nakon poliranja površine dijamantnom pastom s različitim veličinama čestica (0,25, 3 i 6  $\mu m$ ) mjerila se hrapavost površine.

Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 0,25  $\mu m$  je prikazani su na slici 19.



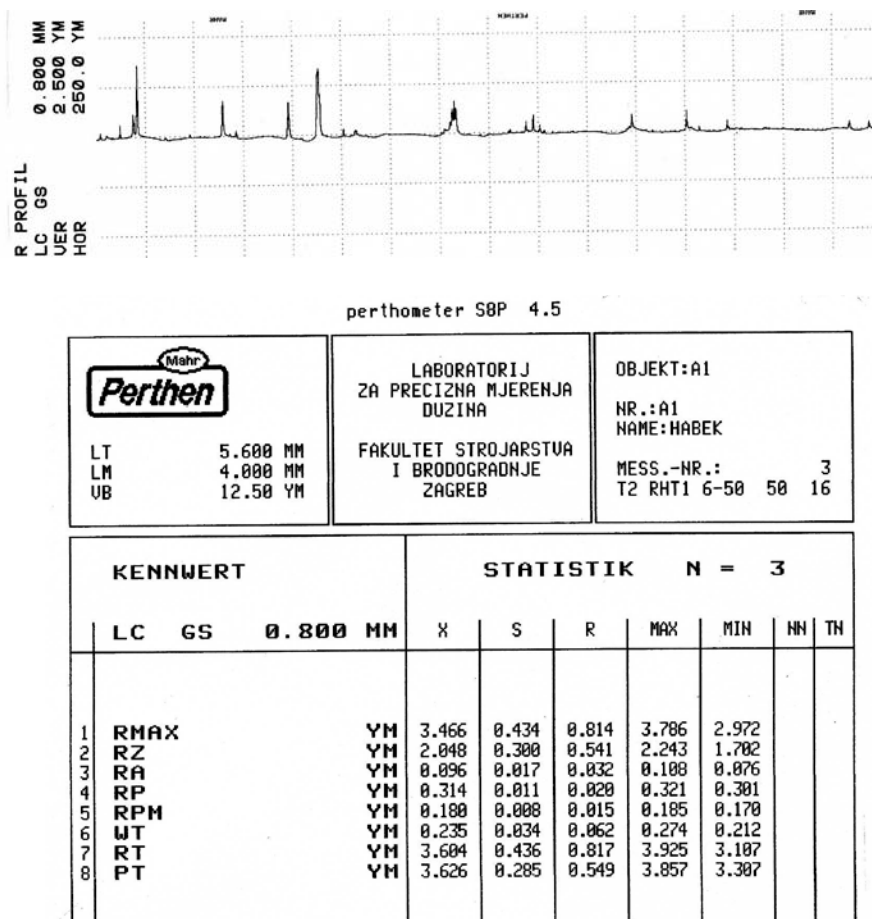
Slika 19. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica 0,25  $\mu m$

Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica  $3\ \mu m$  je prikazani su na slici 20.



Slika 20. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica  $3\ \mu m$

Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 6  $\mu m$  je prikazani su na slici 21.



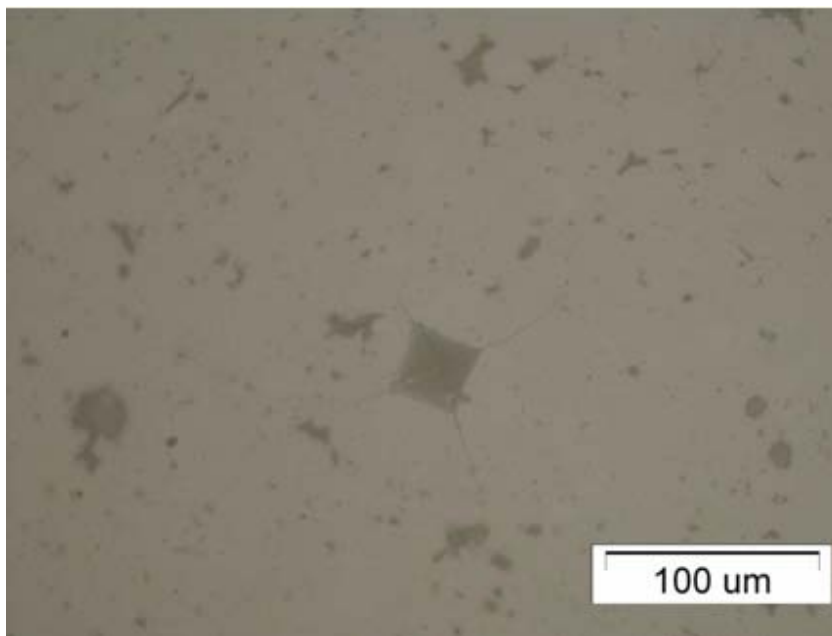
Slika 21. Rezultati mjerenja hrapavosti nakon poliranja pastom veličine čestica 6  $\mu m$

## 4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

Nakon mjerenja hrapavosti površine provedeno je ispitivanje tvrdoće pod različitim opterećenjima:

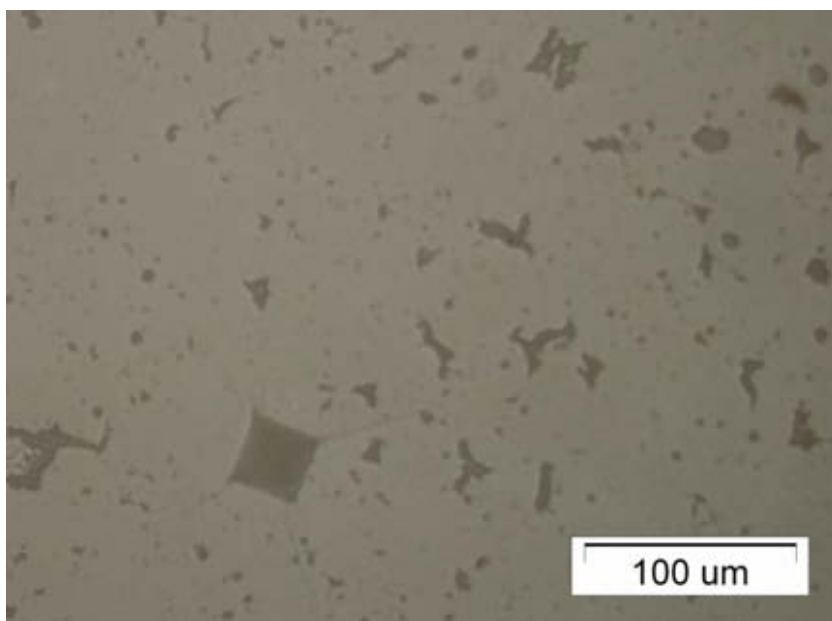
- 9,81 N (HV1)
- 29,43 N (HV3)
- 49,05 N (HV5)

Prilikom prodiranja penetratora u materijal sa opterećenjem **29,43 N (HV3)** koji je završno poliran sa **0,25  $\mu m$**  nastao je otisak prikazan na slici 22.



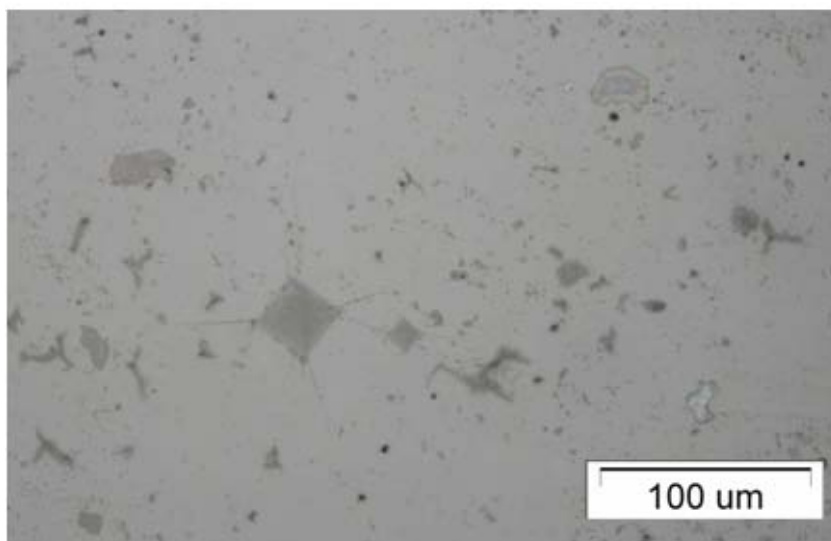
*Slika 22. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25  $\mu m$*

Prilikom prodiranja penetratora u materijal sa opterećenjem **29,43 N (HV3)** koji je završno poliran sa **3  $\mu m$**  nastao je otisak prikazan na slici 23.



*Slika 23. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3  $\mu m$*

Prilikom prodiranja penetratora u materijal sa opterećenjem **29,43 N (HV3)** koji je završno poliran sa **6  $\mu m$**  nastao je otisak prikazan na slici 24.



*Slika 24. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6  $\mu m$*

Rezultati mjerenja tvrdoće površine završno polirane sa dijamantnom pastom veličine čestica 0,25  $\mu m$ , prikazani su u tablicama 3,4 i 5.

U tablici 3 prikazani su rezultati za opterećenje HV1.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$  pod opterećenjem HV1.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV1
1.	32,50	1756
2.	36,00	1431
3.	34,50	1559
4.	33,50	1653
5.	33,50	1653
6.	34,25	1581
7.	33,75	1629
8.	33,50	1653
9.	33,25	1678
10.	33,50	1653
11.	32,50	1756
12.	32,00	1812
13.	33,25	1678
14.	32,50	1756
15.	32,00	1812
16.	34,00	1605
17.	32,00	1812
18.	33,00	1703
19.	32,00	1812
20.	32,50	1756
21.	34,50	1559
22.	33,75	1629
23.	32,50	1756
24.	32,00	1812
25.	32,25	1784
26.	34,00	1605
27.	33,00	1703
28.	34,00	1605
29.	32,25	1784
30.	32,50	1756
srednja vrijednost	33,16	1691



U tablici 4 prikazani su rezultati za opterećenje HV3.

Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$  pod opterećenjem HV3.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV3
1.	58,75	1612
2.	55,25	1823
3.	56,25	1758
4.	56,50	1743
5.	58,50	1626
6.	57,75	1668
7.	56,25	1758
8.	56,75	1727
9.	58,50	1626
10.	57,00	1712
11.	57,50	1683
12.	57,00	1712
13.	56,75	1727
14.	59,50	1571
15.	59,00	1598
16.	57,25	1697
17.	59,00	1598
18.	59,00	1598
19.	56,75	1727
20.	58,00	1654
21.	56,00	1774
22.	58,50	1626
23.	57,50	1683
24.	56,25	1758
25.	57,25	1697
26.	58,00	1654
27.	57,75	1668
28.	59,00	1598
29.	56,50	1743
30.	55,25	1823
srednja vrijednost	57,44	1688

U tablici 5 prikazani su rezultati za opterećenje HV5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$  pod opterećenjem HV5.

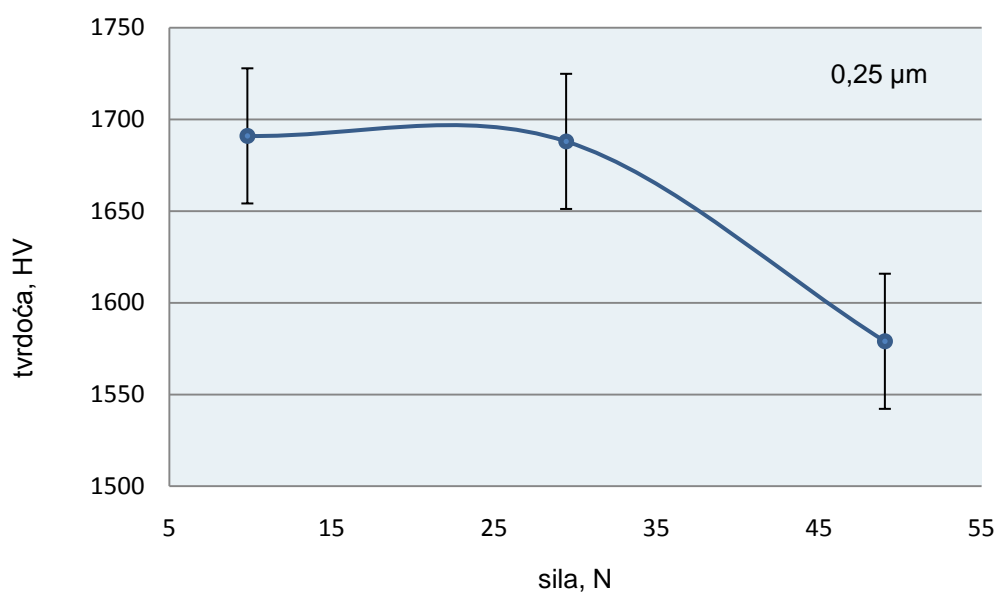
redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV5
1.	77,00	1564
2.	78,00	1524
3.	77,00	1564
4.	78,00	1524
5.	76,25	1595
6.	78,00	1524
7.	75,50	1627
8.	76,00	1605
9.	76,25	1595
10.	76,00	1605
11.	77,00	1564
12.	76,75	1574
13.	76,00	1605
14.	76,00	1605
15.	78,00	1524
16.	76,25	1595
17.	75,50	1627
18.	76,00	1605
19.	76,00	1605
20.	76,75	1574
21.	77,00	1564
22.	76,00	1605
23.	75,50	1627
24.	76,75	1574
25.	77,50	1544
26.	76,00	1605
27.	77,25	1554
28.	77,75	1534
29.	75,50	1627
30.	78,00	1524
srednja vrijednost	76,65	1579

U tablici 6 prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$ .

Tablica 6. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$ .

Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]
1	9,81	1691
3	29,43	1688
5	49,05	1579

Na slici 25 grafički je prikazana ovisnost tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$ .



Slika 25. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $0,25\ \mu m$ .

Rezultati mjerenja tvrdoće površine završno polirane sa dijamantnom pastom veličine čestica  $3\ \mu m$ , prikazani su u tablicama 7,8 i 9.

U tablici 7 prikazani su rezultati za opterećenje HV1.

Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $3\ \mu m$  pod opterećenjem HV1.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, $d\ [\mu m]$	HV1
1.	35,75	1451
2.	31,50	1870
3.	33,50	1653
4.	34,50	1559
5.	31,75	1840
6.	32,75	1730
7.	32,00	1812
8.	33,00	1703
9.	32,75	1730
10.	31,75	1840
11.	32,00	1812
12.	32,25	1784
13.	32,00	1812
14.	32,00	1812
15.	32,50	1756
16.	35,50	1472
17.	32,50	1756
18.	32,25	1784
19.	32,25	1784
20.	32,25	1784
21.	35,50	1472
22.	31,75	1840
23.	33,00	1703
24.	32,75	1730
25.	33,50	1653
26.	35,75	1451
27.	31,50	1870
28.	35,50	1472
29.	34,50	1559
30.	32,00	1812
srednja vrijednost	33,02	1710

U tablici 8 prikazani su rezultati za opterećenje HV3.

Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $3\ \mu m$  pod opterećenjem HV3.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV3
1.	59,25	1585
2.	58,50	1626
3.	57,00	1712
4.	60,00	1545
5.	58,00	1654
6.	61,75	1459
7.	60,50	1520
8.	59,50	1571
9.	62,25	1436
10.	56,25	1758
11.	59,25	1585
12.	58,50	1626
13.	57,25	1697
14.	58,25	1640
15.	58,75	1612
16.	58,00	1654
17.	59,25	1585
18.	58,50	1626
19.	56,00	1774
20.	58,50	1626
21.	58,25	1640
22.	57,25	1697
23.	59,50	1571
24.	58,00	1654
25.	60,00	1545
26.	58,50	1626
27.	56,75	1727
28.	59,25	1585
29.	56,00	1774
30.	57,25	1697
srednja vrijednost	58,53	1627

U tablici 9 prikazani su rezultati za opterećenje HV5.

Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $3\ \mu m$  pod opterećenjem HV5.

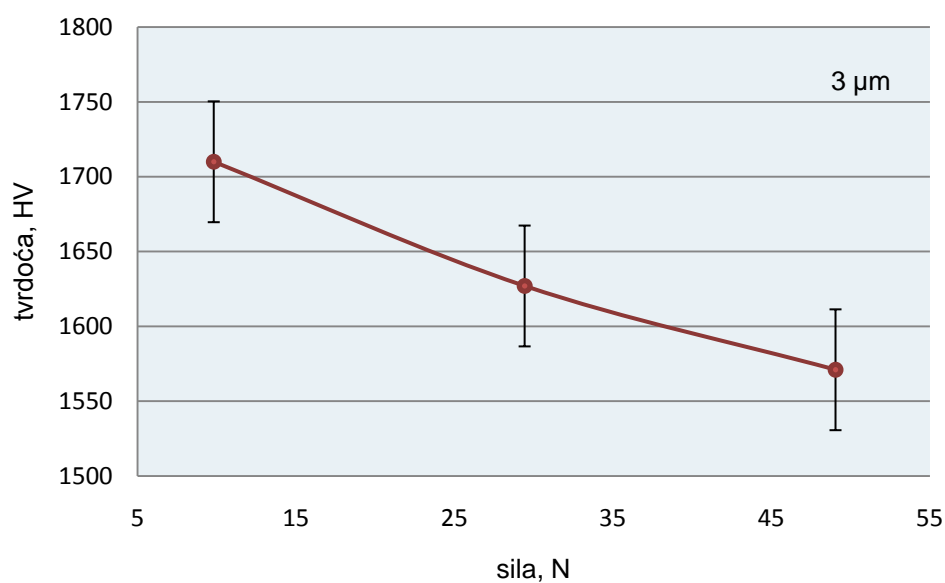
redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, $d\ [\mu m]$	HV5
1.	77,00	1564
2.	78,00	1524
3.	76,75	1574
4.	76,00	1605
5.	77,50	1544
6.	75,50	1627
7.	76,00	1605
8.	75,50	1627
9.	76,50	1584
10.	76,00	1605
11.	76,75	1574
12.	78,00	1524
13.	76,50	1584
14.	77,25	1554
15.	77,00	1564
16.	77,50	1544
17.	76,50	1584
18.	76,50	1584
19.	77,50	1544
20.	77,00	1564
21.	78,00	1524
22.	76,00	1605
23.	76,75	1574
24.	76,25	1595
25.	76,25	1595
26.	77,00	1564
27.	77,00	1564
28.	76,50	1584
29.	78,25	1514
30.	78,00	1524
srednja vrijednost	76,84	1571

U tablici 10 prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $3\ \mu m$ .

Tablica 10. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $3\ \mu m$ .

Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]
1	9,81	1710
3	29,43	1627
5	49,05	1571

Na slici 26 grafički je prikazana ovisnost tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $3\ \mu m$ .



Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $3\ \mu m$ .

Rezultati mjerenja tvrdoće površine završno polirane sa dijamantnom pastom veličine čestica 6  $\mu m$ , prikazani su u tablicama 11,12 i 13.

U tablici 11 prikazani su rezultati za opterećenje HV1.

Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 6  $\mu m$  pod opterećenjem HV1.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV1
1.	33,00	1703
2.	35,50	1472
3.	32,25	1784
4.	33,25	1678
5.	32,75	1730
6.	31,75	1840
7.	34,25	1581
8.	32,50	1756
9.	31,50	1870
10.	32,25	1784
11.	32,00	1812
12.	33,00	1703
13.	31,75	1840
14.	32,50	1756
15.	32,75	1730
16.	33,00	1703
17.	32,50	1756
18.	33,25	1678
19.	32,75	1730
20.	33,75	1629
21.	32,00	1812
22.	33,25	1678
23.	31,50	1870
24.	32,75	1730
25.	33,50	1653
26.	34,00	1605
27.	33,00	1703
28.	34,75	1536
29.	31,50	1870
30.	34,50	1559
srednja vrijednost	32,90	1718



U tablici 12 prikazani su rezultati za opterećenje HV3.

Tablica 12. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom  $6\ \mu m$  pod opterećenjem HV3.

redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, $d\ [\mu m]$	HV3
1.	57,75	1668
2.	59,50	1571
3.	58,25	1640
4.	58,25	1640
5.	57,25	1697
6.	57,00	1712
7.	58,00	1654
8.	58,00	1654
9.	57,75	1668
10.	58,00	1654
11.	59,00	1598
12.	60,75	1507
13.	59,00	1598
14.	61,25	1483
15.	57,50	1683
16.	57,75	1668
17.	58,75	1612
18.	56,75	1727
19.	56,00	1774
20.	57,50	1683
21.	56,00	1774
22.	58,50	1626
23.	59,00	1598
24.	58,00	1654
25.	57,25	1697
26.	56,50	1743
27.	57,75	1668
28.	61,00	1495
29.	58,50	1626
30.	57,75	1668
srednja vrijednost	58,14	1648

U tablici 13 prikazani su rezultati za opterećenje HV5.

Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće površine polirane sa dijamantnom pastom 6  $\mu m$  pod opterećenjem HV5.

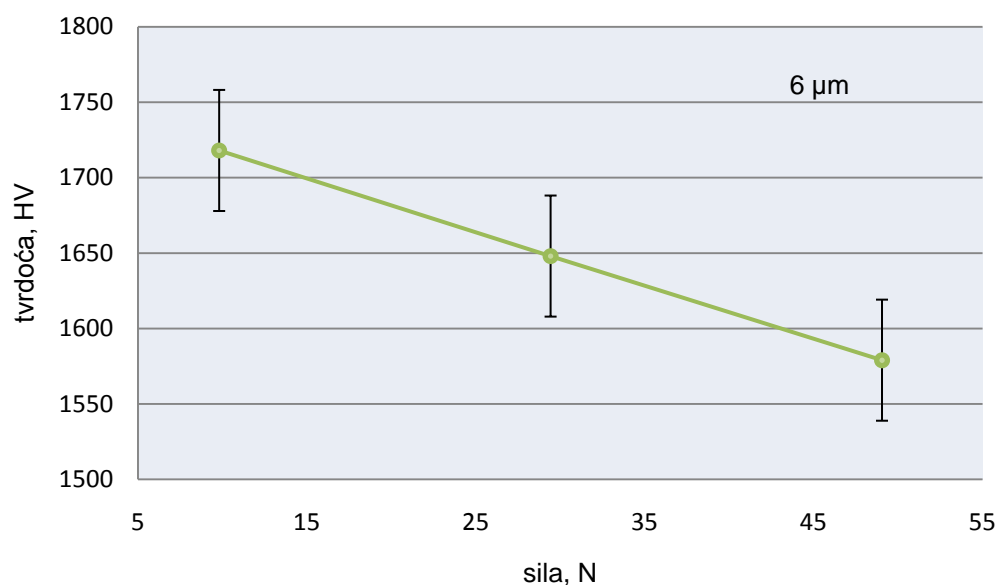
redni broj mjerenja	srednja duljina dijagonale otiska, d [ $\mu m$ ]	HV5
1.	78,00	1524
2.	78,25	1514
3.	76,25	1595
4.	76,25	1595
5.	77,00	1564
6.	77,25	1554
7.	76,75	1574
8.	75,50	1627
9.	77,00	1564
10.	76,50	1584
11.	77,00	1564
12.	76,75	1574
13.	76,00	1605
14.	75,75	1616
15.	75,75	1616
16.	76,50	1584
17.	77,25	1554
18.	76,50	1584
19.	77,50	1544
20.	75,50	1627
21.	76,50	1584
22.	76,00	1605
23.	77,25	1554
24.	77,50	1544
25.	76,25	1595
26.	76,50	1584
27.	77,00	1564
28.	75,75	1616
29.	77,00	1564
30.	76,00	1605
srednja vrijednost	76,63	1579

U tablici 14 prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $6\ \mu m$ .

Tablica 14. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća za površinu završno poliranu dijamantnom pastom  $6\ \mu m$ .

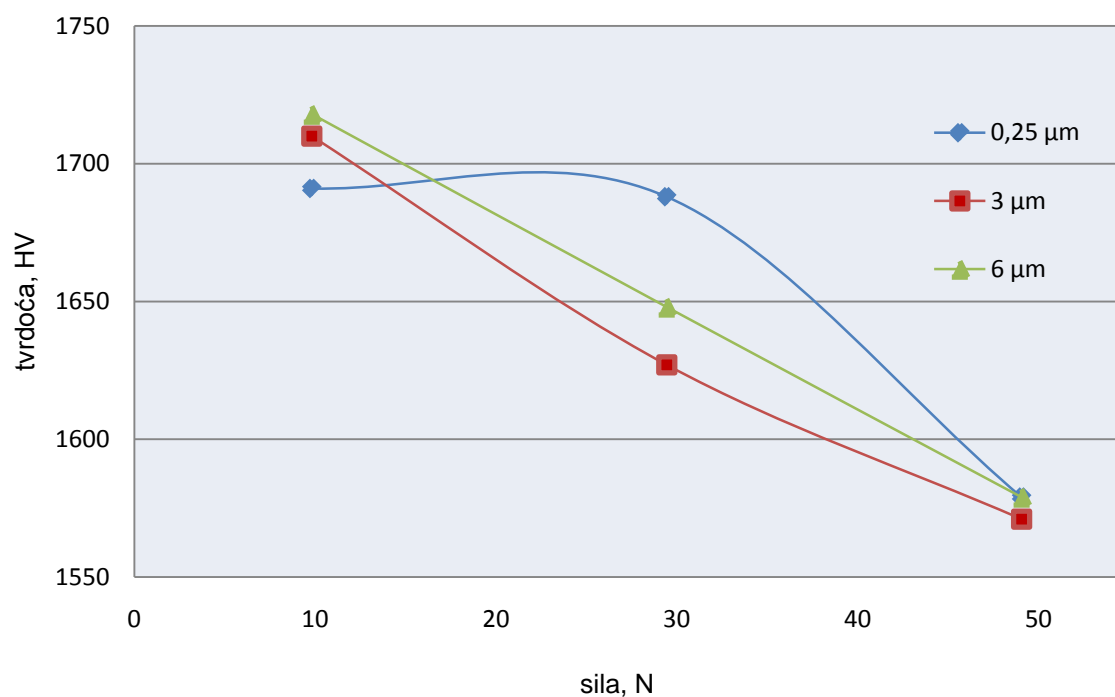
Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]
1	9,81	1718
3	29,43	1648
5	49,05	1579

Na slici 27 grafički je prikazana ovisnost tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $6\ \mu m$ .



Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti tvrdoće o opterećenju uzorka završno poliranog dijamantnom pastom  $6\ \mu m$ .

Kako bi se dobila jasnija slika o promjeni tvrdoće u ovisnosti o različitoj hrapavosti površine  $Al_2O_3$  keramike, napravljen je dijagram prikazan na slici 28 koji objedinjuje sve tri krivulje tvrdoće. U tablici 15, navedene su sve prosječne tvrdoće koje su dobivene ispitivanjem na površini s različitom hrapavošću.



Slika 28. Dijagramski prikaz ovisnosti tvrdoće o sili utisnuća

U tablici 15, navedene su sve prosječne tvrdoće koje su dobivene ispitivanjem na površini s različitom hrapavošću.

Tablica 15. Prosječne vrijednosti tvrdoća za hrapavost površine nakon završnih poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 0,25 µm, 3 µm i 6 µm

Sila, F [N]	Tvrdoća, HV		
	0,25 µm	3 µm	6 µm
9,81	1691	1710	1718
29,43	1688	1627	1648
49,05	1579	1571	1579

## 5. ZAKLJUČCI

Zaključiti se može da **hrapavost površine**  $Al_2O_3$  keramike značajno **ne utječe** na izmjerenu tvrdoću navedenog materijala. Pri HV 5 opterećenju, kod površina poliranih sa dijamantnom pastom 0,25  $\mu m$  te 6  $\mu m$  vrijednosti tvrdoće su čak i jednake kao što je vidljivo iz tablice.

Prosječna tvrdoća materijala poliranog sa dijamantnom pastom od 0,25  $\mu m$  je 1653 HV, nakon poliranja sa dijamantnom pastom od 3  $\mu m$  je 1636 HV, dok je nakon poliranja sa dijamantnom pastom od 6  $\mu m$  1648 HV.

Prosječna tvrdoća je nakon drugog poliranja (3 $\mu m$ ) pala za 17 HV u odnosu na prosječnu tvrdoću nakon prvog poliranja (0,25  $\mu m$ ), što je zanemarivo.

Prosječna tvrdoća je nakon 3. poliranja (6 $\mu m$ ) porasla za 12  $\mu m$  u odnosu na prosječnu tvrdoću nakon 2. poliranja (3  $\mu m$ ), što je također zanemarivo.

Također je vidljivo da **tvrdoća pada povećanjem sile utiskivanja**. Kod prvog mjerenja (uzorak poliran sa dijamantnom pastom veličine čestica 0,25  $\mu m$ ), prosječna tvrdoća je pala kod uzorka opterećenog sa 49,05 N (HV5) u odnosu na prosječnu tvrdoću uzorka opterećenog sa 9,81 N (HV1) za 112 HV.

Kod drugog mjerenja (uzorak poliran sa dijamantnom pastom veličine čestica 3  $\mu m$ ), prosječna tvrdoća je pala kod uzorka opterećenog sa 49,05 N (HV5) u odnosu na prosječnu tvrdoću uzorka opterećenog sa 9,81 N (HV1) za 139 HV.

Kod trećeg mjerenja (uzorak poliran sa dijamantnom pastom veličine čestica 6  $\mu m$ ), prosječna tvrdoća je pala kod uzorka opterećenog sa 49,05 N (HV5) u odnosu na prosječnu tvrdoću uzorka opterećenog sa 9,81 N (HV1) za također 139 HV.

## 6. POPIS LITERATURE

- [1] T. Filetin, I. Kramer : TEHNIČKA KERAMIKA priručnik za primjenu, Zagreb, 2004.
- [2] I. Martinek: Određivanje tvrdoće i lomne žilavosti silicij karbida (diplomski rad), Zagreb, 2008.
- [3] T. Cvrtila: Određivanje mikrotvrdoće i lomne žilavosti aluminij oksidne keramike (završni rad), Zagreb, 2008.
- [4] B. Hmura: Utjecaj hrapavosti površine na lomnu žilavost Sic tehničke keramike (završni rad), Zagreb 2009.
- [5] Kolemen, U.: Analysis of ISE in microhardness measurements of bulk  $MgB_2$  superconductors using different models, *J. Alloys Compd.* 425, 429-435 (2006).
- [6] Sahin, O.; Uzun, O.; Kolemen, U.; Ucar, N.: Vickers microindentation hardness studies of  $\alpha$ -Sn single crystal, *Mater. Characterization*, 58, 197-204 (2007).
- [7] <http://bama.ua.edu/~mwear/courses/MechBeh/M02a.pdf>
- [8] [http://www.fsb.hr/elemtroj/pdf/design/2007/hrapavost\\_tehnickih\\_povrsina.pdf](http://www.fsb.hr/elemtroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf)
- [9] [http://www.fsb.hr/NewsUpload/01\\_01\\_2009\\_6457\\_TTM2006-1.pdf](http://www.fsb.hr/NewsUpload/01_01_2009_6457_TTM2006-1.pdf)
- [10] Chinn, R. E.: Ceramography Preparation and Analysis of Ceramic Microstructures, ASM International, USA, 2002.
- [11] Ćurković, L. : Prezentacija Keramika, beton i drvo I. dio, Zagreb, 2008./2009.